

УДК 629.78.002.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ НА ПОЛЕ МИКРОУСКОРЕНИЙ ЕЕ ВНУТРЕННЕЙ СРЕДЫ

© 2011 А.В. Седельников, В.В. Юдинцев

Институт энергетики и транспорта
Самарского государственного аэрокосмического университета

Поступила в редакцию 12.03.2011

В работе рассмотрена задача оценки влияния эффекта температурных деформаций больших упругих элементов космической лаборатории на модуль микроускорений, возникающих в ее внутренней среде. Проведена оценка для панели солнечной батареи на основе ее конечноэлементной модели. Показана актуальность оценки влияния для космических аппаратов, на борту которых планируется проводить гравитационно-чувствительные технологические процессы.

Ключевые слова: *температурные деформации, большие упругие элементы, космическая лаборатория, микроускорения*

Рассматривается такая орбита космического аппарата (КА), при движении по которой он периодически оказывается в тени Земли, а затем снова на освещенном Солнцем участке. Существенный перепад температур на различных участках траектории, а также резкий переход из одного температурного режима в другой (температурный удар) обуславливают актуальность проблемы оценки микроускорений, порождаемых температурными деформациями больших упругих элементов, при реализации на борту КА гравитационно-чувствительных процессов [1].

Проблему температурных деформаций больших упругих элементов, таких как панели солнечных батарей (ПСБ), исследовали как отечественные [2-3], так и зарубежные авторы [4-6]. Однако задача оценки микроускорений в этих работах не ставилась. В работе [7] рассмотрена оценка микроускорений с помощью одномерной модели теплопроводности при балочном представлении больших упругих элементов и жестком креплении их к корпусу КА. Результаты численного моделирования для схемы КА типа «НИКА-Т» показывают, что температурные деформации ПСБ в диапазоне температур от -170°C до 120°C способны создавать микроускорения до 200 мкм/с^2 . При этом требования по микроускорениям в проекте «НИКА-Т» составляли не более 20 мкм/с^2 [1]. Однако следует заметить, что балочное представление ПСБ имеет ряд существенных недостатков: 1) неадекватное представление теплоотдачи с поверхности ПСБ; 2) точечное крепление ПСБ к корпусу КА; 3) неадекватное представление поля температур

внутри упругого элемента. Эти недостатки ставят под сомнение полученную оценку в случае реальной ПСБ, схема которой далека от балки Эйлера-Бернулли.

Следующим шагом на пути создания адекватной оценки микроускорений стала трехмерная модель теплопроводности с представлением ПСБ однородной ортотропной пластиной. Такая модель рассмотрена в работе [8]. Учет изменения формы пластины и излучения с ее поверхности показал завышенность оценки [7]. Оценка микроускорений для тех же проектных параметров КА типа «НИКА-Т» в таком же диапазоне температур показала, что их максимальное значение вряд ли превысит 1 мкм/с^2 . Однако и эти исследования не дают однозначного ответа на вопрос о необходимости учета температурных деформаций больших упругих элементов при моделировании поля микроускорений внутренней среды КА. Требования к модулю микроускорений в новом технологическом проекте «ОКА-Т» составляют не более 10 мкм/с^2 [1]. Полученная оценка на порядок ниже этого значения, однако модель однородной ортотропной пластины слишком упрощенно описывает реальную ПСБ. Более точную оценку влияния температурных деформаций можно получить численным моделированием с применением метода конечных элементов. Современная ПСБ состоит из силового каркаса с прикрепленной к нему сеткой фотоэлементов (рис. 1). Для моделирования теплового удара такой конструкции использовался пакет «COMSOL Multiphysics» v. 3.5a. Каркас ПСБ моделировался тонкостенной трубкой квадратного сечения со стороной 25 мм и толщиной стенки 2 мм. Одна сторона каркаса жестко закреплена.

Седельников Андрей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, директор. E-mail: axe_backdraft@inbox.ru

Юдинцев Вадим Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики. E-mail: yudintsev@classmech.ru

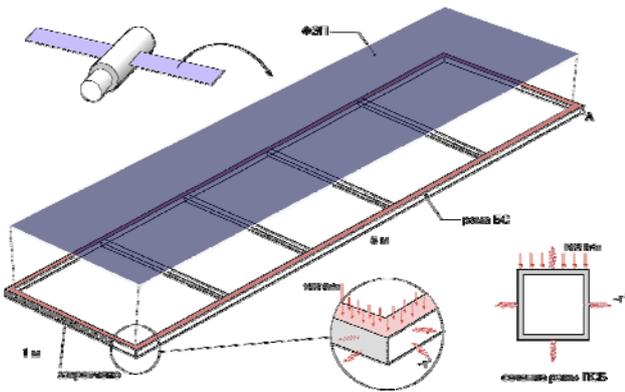


Рис. 1. Схема ПСБ

Каркас ПСБ выполнен из материала МА-2, характеристики которого представлены в [9]. Предполагается что одна сторона ПСБ обращена к Солнцу и на конструкцию воздействует тепловой поток 1000 Вт/м^2 . Поверхность ПСБ излучает тепло по закону Стефана-Больцмана:

$$P = S \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4)$$

где ε – «степень черноты» поверхности, которая принята равной 0,3; S – площадь внешней поверхности рамы ПСБ. Начальная температура

ПСБ считалась равной $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Уравнение теплопроводности для этого случая примет вид:

$$\delta \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla_t \cdot (-\delta k \nabla_t T) = q - \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4)$$

где ρ – плотность материала; δ – толщина пластины (стенки сечения); C_p – теплоемкость материала при постоянном давлении; q – тепловой поток на единицу площади (для солнечной стороны $q=1000 \text{ Вт/м}^2$); k – теплопроводность материала; $T_c=3\text{К}$ – равновесная температура космического пространства (без учета влияния излучения Солнца и Земли).

В результате проведенных расчетов получены следующие результаты. При быстром нагреве и температурном расширении, обращенной к Солнцу поверхности ПСБ, рама ПСБ изгибается: график, показывающий перемещение концевой точки панели, приведен на рис. 2а. Максимальная деформация изгиба ПСБ соответствует перемещению концевой точки (точка А, см. рис. 1) приблизительно на 16 мм. Динамика процесса деформации ПСБ характеризуется максимальной скоростью точки А порядка 1-2 мм/с. График изменения скорости точки А приведен на рис. 2б.

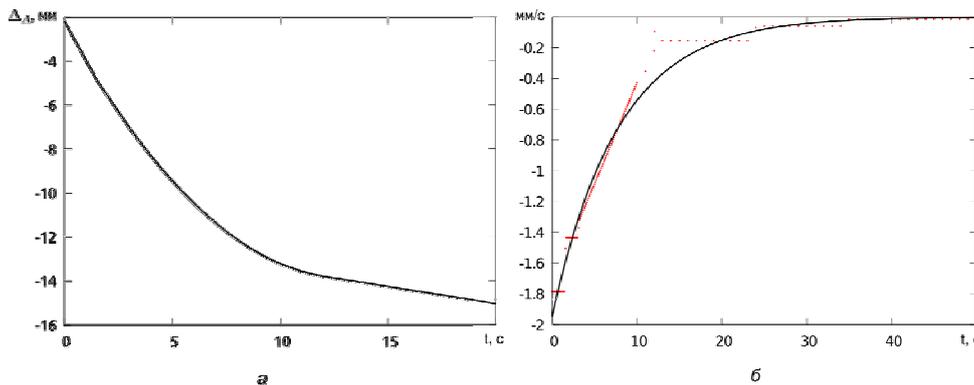


Рис. 2. Перемещение и скорость концевой точки А панели СБ

Рассмотренный тепловой режим ПСБ приводит к стабилизации температуры конструкции на уровне $+70^\circ\text{C}$. График изменения температуры точки А показан на рис. 3.

На основе полученных результатов оценим микроускорения, порождаемые температурными деформациями больших упругих элементов КА. С этой целью рассчитаем максимальный момент от касательной силы инерции, возникающий при температурных деформациях:

$$M(\Phi_\tau) = \int_0^l \gamma x^2 \ddot{y}_{\max} dx$$

где γ – погонная масса ПСБ, а l – длина ПСБ. Из рис. 2б оценим максимальное ускорение краевой точки А при тепловом ударе:

$\ddot{y}_A^{\max} \approx 0,14 \text{ мм/с}^2$. Тогда, пользуясь грубой линейной оценкой:

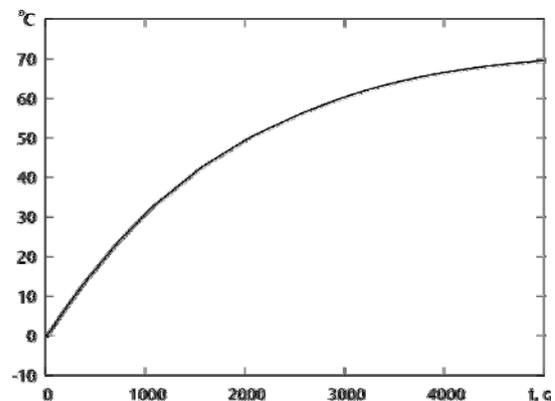


Рис. 3. Изменение температуры материала ПСБ в точке А

$\ddot{y}_{\max} = \ddot{y}_A^{\max} / 2 = 0,07 \text{ мм/с}^2$, а максимальный момент:

$$M(\Phi_{\tau}) = \int_0^5 \gamma x^2 \ddot{y}_{\max} dx \approx 0,3 \text{ Нм},$$

при расчетах $\gamma=20 \text{ кг/м}$ [1]. Микроускорения могут быть оценены как:

$$w_{\max} = \frac{M(\Phi_{\tau})}{I} R \approx 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$$

При расчетах: $I=16100 \text{ кг м}^2$, а $R=1 \text{ м}$ – радиус вектор предполагаемой точки размещения технологического оборудования относительно центра масс КА [1].

Таким образом, полученная оценка на порядок ниже, чем при моделировании ПСБ балкой Эйлера-Бернулли, однако существенно выше, чем при моделировании ПСБ однородной ортотропной пластиной. В целом ввиду завышенности полученной оценки можно утверждать, что сами по себе температурные деформации больших упругих элементов КА типа «НИКА-Т» не нарушили бы условий микрогравитационного штиля (20 мкм/с^2) даже кратковременно при тепловом ударе, однако в совокупности с другими возмущениями ситуация могла бы измениться. Что касается КА типа «ОКА-Т», для которого микроускорения не должны превышать 10 мкм/с^2 , то, благодаря применению композитных материалов и существенному снижению погонной массы ПСБ, значение w_{\max} также будет ниже приведенного, однако это требует отдельного исследования, выходящего за рамки данной работы.

Выводы: получены новые результаты влияния температурных деформаций на крупногабаритных элементов конструкции КА на выполнение условий микрогравитационного штиля, которые свидетельствуют о необходимости учета этого

эффекта для КА, на борту которого предполагается проводить гравитационно-чувствительные технологические процессы. Эти результаты могут быть использованы при проектировании современных КА специализированного технологического назначения, таких как «ОКА-Т», с целью обеспечения требуемого уровня микроускорений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Седельников, А.В.* Проблема микроускорений: от осознания до фрактальной модели. – М.: РАН, Избранные труды Российской школы, 2010. 107 с.
2. *Бураго, Н.Г.* Численное решение упругопластических задач методом конечных элементов / *Н.Г. Бураго, В.Н. Кукуджанов* // Препринт ИПМех АН СССР. 1988. №326.
3. *Тестоедов, Н.А.* Определение величины температурной деформации сотовой панели спутника / *Н.А. Тестоедов, В.М. Михалкин, Г.В. Девирный* и др. // Материалы XIV Международной научной конференции. Красноярск. 2010. Т1. С. 88-89.
4. *Narasimha, M.* Thermally induced vibration of a simply supported beam using finite element method / *M. Narasimha, K.K. Appu Kuttan, K. Ravikiran* // International journal of engineering science and technology. 2010. Vol. 2(12). P. 7874-7879.
5. *Zhang, L.* The on-orbit thermal-structural analysis of the spacecraft component using MSC/NASTRAN / *L. Zhang, Y. Chen* // MSC 1999 Aerospace Users' Conference Proceedings. 1999. P. 1-8.
6. *Johnston, J.D.* Thermally induced attitude dynamics of a spacecraft with a flexible appendage / *J.D. Johnston, E.A. Thornton* // Journal of guidance, control and dynamics. 1998. №4. P. 581-587.
7. *Седельников, А.В.* О влиянии температурных деформаций упругих элементов на динамику движения космического аппарата / *А.В. Седельников, М.И. Казарина* // Известия СЦ РАН. 2010. Т. 12. №4. С. 321-324.
8. *Седельников, А.В.* Влияние температурных деформаций упругих элементов на динамику КА типа «НИКА-Т» / *А.В. Седельников, М.И. Казарина* // Вестник МАИ. 2011. №2. С. 35-38.
9. *Третьяков, А.В.* Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / *А.В. Третьяков, В.И. Зюзин*. – М.: Металлургия, 1973. 224 с.

ESTIMATION OF TEMPERATURE DEFORMATIONS INFLUENCE OF SPACE LABORATORY ELASTIC ELEMENTS ON THE FIELD OF MICROACCELERATIONS OF ITS INTERNAL ENVIRONMENT

© 2011 A.V. Sedelnikov, V.V. Yudintsev

Power and Transport Institute of Samara State Aerospace University

In work the problem of estimation the influence of temperature deformations effect of space laboratory big elastic elements on the module of microaccelerations, arising in its internal environment is considered. The estimation for solar battery panel on the basis of it final elements model is spent. The urgency of estimation the influence for space vehicles on which board it is planned to spend gravitastional sensitive technological processes is shown.

Key words: *temperature deformations, big elastic elements, space laboratory, microaccelerations*

Andrey Sedelnikov, Candidate of Physics and Mathematics, Director.

E-mail: axe_backdraft@inbox.ru

Vadim Yudintsev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

at the Theoretical Mechanics Department. E-mail: yudintsev@classmech.ru